6И

УДК 681.5.01

Д.Я. Иванов
Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог
donat.ivanov@gmail.com

Информационный обмен в больших группах роботов

В статье рассматривается проблема обеспечения информационного обмена между роботами при их групповом применении. Показаны особенности информационного обмена в зависимости от выбранной стратегии управления.

Введение

Применение групп роботов является перспективным направлением развития робототехники. В отличие от одиночных роботов, имеющих ограничения по радиусу действия, емкости бортовых энергоресурсов и набору бортовых исполнительных устройств, группа роботов позволяет решать разнообразные задачи на больших территориях. Наибольший интерес групповое применение роботов приобретает в недетерминированной среде и в условиях организованного противодействия.

Первые научные исследования в области применения групп роботов, взаимодействующих между собой для достижения общей цели, проводились в 80-х годах XX века [1], [2], решался ряд узкоспециализированных задач. Первые попытки систематизации исследований в области коллективного управления роботами при их групповом взаимодействии и построения теоретической и методологической базы для их дальнейшего развития совершены в начале 2000-х годов [3], [4]. Эволюция систем группового управления идет в направлении увеличения децентрализации с сохранением за центром только обеспечения общесистемных не поддающихся декомпозиции функций группы [5]. Современная тенденция к миниатюризации делает более перспективным их групповое применение.

Целью данной работы является исследование методов организации информационного обмена между роботами при их групповом применении.

Информационный обмен при централизованном управлении

Характер информационного обмена в группе роботов во многом зависит от выбора стратегии управления группой роботов. Стратегии централизованного управления группой роботов делятся на два класса: стратегии, использующие принципы единоначального управления, и стратегии, использующие принципы иерархического управления [4].

При использовании стратегий централизованного единоначального управления группой роботов R, каждый робот $R_i (i = 1, 2, \dots, N)$ группы передает информацию о своем состоянии и собранную информацию об окружающей среде на центральное устройство управления, а также получает команды от центрального устройства управления (рис. 1). В группе из N роботов, где каждый робот передает на центральное устройство управления сообщения объемом K_{out} и принимает команды объемом K_{inp}, объем передаваемой информации можно оценить как:

$$I = N(K_{inp} + K_{out}).$$

Таким образом, нагрузка на канал связи прямо пропорциональная количеству роботов в группе.

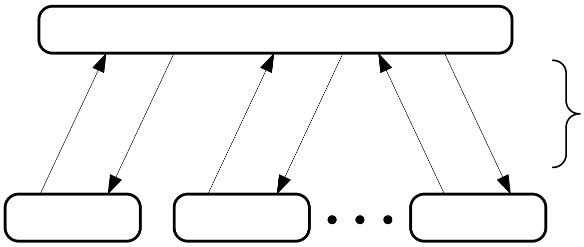


Рисунок 1 – Информационный обмен при использовании стратегий централизованного единоначального управления

В больших группах, насчитывающих десятки или даже сотни роботов, нагрузка на канал связи возрастает настолько, что для обеспечения надежной и своевременной передачи информации требуются особые технические решения. В первую очередь необходимо выбрать подходящий способ организации информационного обмена таким образом, чтобы обеспечить регулярные сеансы связи между каждым роботом группы и центральным устройством управления с некоторым периодом T. При этом желательно чтобы команды от центрального устройства управления K_{inp} роботу не следовали сразу после передачи роботом собранной информации об окружающей среде K_{out}, ведь центральному устройству управления необходимо время t_{ccd} для того, чтобы оценить влияние изменений в окружающей среде. Также бортовому вычислительному устройству робота необходимо время t_{bcs} на анализ поступивших команд K_{inp}, сбор и анализ данных об окружающей среде, и формирование ответного пакета K_{out} (рис. 2). Так же для построения более точной модели бывает необходимо получение информации об окружающей среде от соседних роботов.

В идеальном случае для связи каждого робота группы с центральным устройством управления необходим выделенный канал связи. Однако на практике такая схема зачастую экономически нецелесообразна. Вместо этого используют один канал связи. Чаще всего в этой роли выступает радиоканал. Для обеспечения сеансов связи центрального устройства управления с каждым роботом группы используют уплотнение каналов.

В простейшем случае – это временное уплотнение каналов. Роботы и центральное устройство управления выходят в эфир в определенной последовательности друг за другом. С увеличением количества роботов в группе растет временной интервал между выходами на связь каждого участника. Возникает необходимость увеличения скорости передачи информации, что в свою очередь приводит к повышению несущей частоты. Передача информации на высоких частотах на значительные расстояния связана с большими энергетическими потерями, что не всегда приемлемо для микророботов с ограниченным бортовым энергоресурсом.

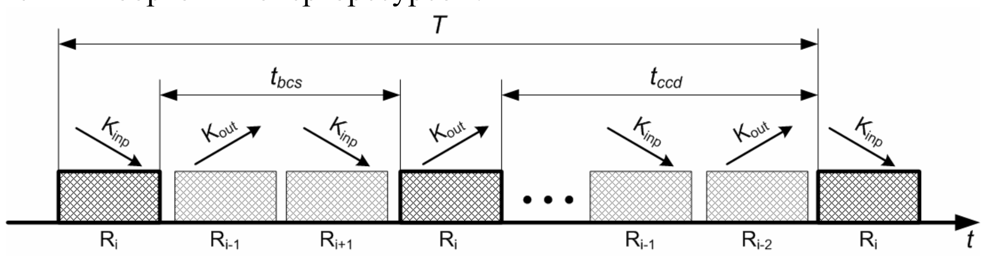


Рисунок 2 – Организация приема и передачи сообщений роботами группы при использовании стратегий централизованного управления

В простейшем случае – это временное уплотнение каналов. Роботы и центральное устройство управления выходят в эфир в определенной последовательности друг за другом. С увеличением количества роботов в группе растет временной интервал между выходами на связь каждого участника. Возникает необходимость увеличения скорости передачи информации, что в свою очередь приводит к повышению несущей частоты. Передача информации на высоких частотах на значительные расстояния связана с большими энергетическими потерями, что не всегда приемлемо для микророботов с ограниченным бортовым энергоресурсом.

Возможно также применение частотного уплотнения каналов. За каждым роботом группы закрепляется поддиапазон частот, на котором ведется передача и прием команд. При таком подходе не избежать использования высокочастотных сигналов, однако для организации связи требуется широкий диапазон частот. К тому же усложняется аппаратура связи центрального устройства управления.

Перспективным представляется использование широкополосных (шумоподобных) сигналов для организации информационного обмена в больших группах роботов, что позволит осуществлять своевременную передачу данных и команд. Применение широкополосных сигналов может быть затруднено сложностью приемо-передающей аппаратуры на борту каждого робота и на центральном устройстве управления.

При использовании стратегий иерархического централизованного управления центральному устройству управления подчинены несколько роботов верхнего уровня иерархии, каждому из которых в свою очередь подчинены несколько роботов нижнего уровня иерархии (рис. 3). Такие сложные схемы управления требуют очень высокой производительности средств связи, ведь все роботы, кроме роботов самого нижнего уровня иерархии, взаимодействуют и с роботами нижнего и верхнего уровней иерархии. Объем информации, проходящей через приемо-передающие устройства робота, можно оценить как:

$$I = n(k_{inp} + k_{out}) + K_{inp} + K_{out},$$

где n – количество роботов в нижеследующей иерархии;

k_{inp} – объем информации во входящих сообщениях от робота нижеследующего уровня иерархии;

k_{out} – объем информации в исходящих сообщениях, передаваемых роботу нижеследующего уровня иерархии.

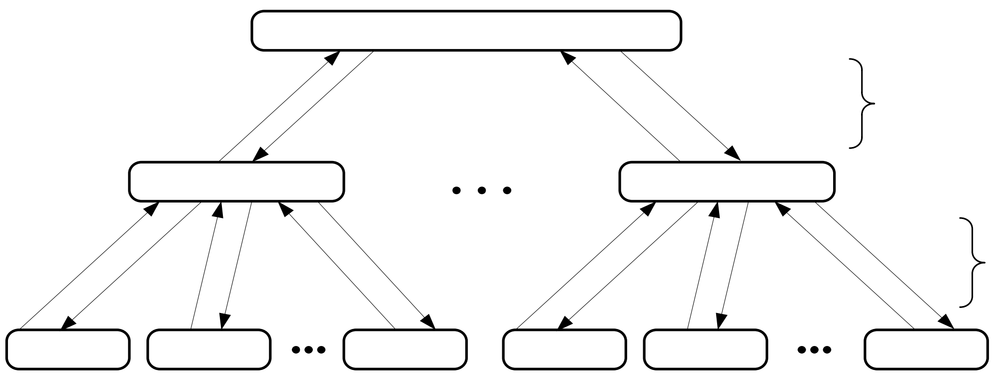


Рисунок 3 – Информационный обмен при использовании стратегий централизованного иерархического управления (показано 2 уровня)

В отличие от единоначального централизованного управления, где каждый робот напрямую связан с центральным устройством управления, в случае иерархического централизованного управления на роботов средних уровней иерархии возложены задачи обработки информации от подчиненных роботов, а также формирования команд управления

для них. Сообщения для вышестоящих уровней иерархии будут включать информацию, полученную от средств сбора данных об окружающей среде, а также информацию, полученную от подчиненных роботов. Отсюда можно сделать вывод, что при использовании иерархического разбиения группы роботов, нагрузка на канал связи, используемый группой для взаимодействия, оказывается выше, чем при использовании централизованного управления без иерархического разбиения.

В управляющих структурах матричного типа, в которых наряду с вертикальной подчиненностью имеются еще и горизонтальные управляющие связи, замкнутые в свою очередь на верхнее руководство, но имеющие свои функции [5], организация информационного обмена еще более усложнена.

Таким образом, при централизованном методе управления большой группой роботов организация информационного обмена представляет серьезные технические сложности.

Информационный обмен при децентрализованном управлении

Децентрализованные стратегии управления примечательны тем, что в группе роботов отсутствует центральное устройство управления. Каждый робот самостоятельно принимает решение о своих дальнейших действиях, опираясь на доступную ему информацию. При этом роботу доступна та информация об окружающей среде, которую он смог самостоятельно получить с помощью бортовых средств, а также та информация, которую он получает от других роботов группы через общий канал связи. В зависимости от того, как организована передача информации между роботами, при децентрализованной стратегии управления выделяют коллективные, стайные и роевые методы управления.

При коллективном децентрализованном методе управления роботы группы обмениваются друг с другом информацией об окружающей среде, а также каждый робот сообщает некоторую информацию о своем состоянии, например, о координатах, выполняемой задаче, возникающих неисправностях (рис. 4). Каждый робот транслирует информацию в канал связи с тем, чтобы любой другой робот группы, заинтересованный в этой информации, мог ее принять.

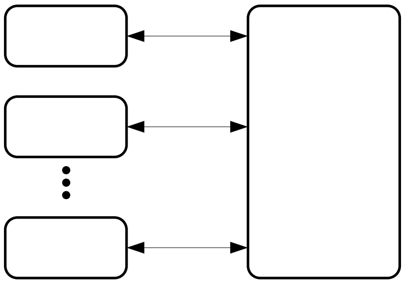


Рисунок 4 – Информационный обмен при использовании стратегий децентрализованного управления

Для организации информационного обмена достаточно определить порядок предоставления канала связи роботам и обеспечить необходимую дальность связи. В данном случае вполне достаточно использования временного разделения каналов.

Нагрузку на канал связи при децентрализованном управлении можно оценить по формуле:

$$I = NK_{out} .$$

Объем передаваемой информации пропорционален количеству роботов в группе, таким образом, с увеличением количества роботов в группе будут увеличиваться требования к пропускной способности канала связи.

Для больших групп микророботов представляются перспективными стайные и роевые методы управления.

При стайном взаимодействии канал связи между роботами либо отсутствует вовсе, либо сильно ограничен. Роботы принимают решение о своих дальнейших действиях на основе полученных самостоятельно данных об окружающей среде. При этом информация о состоянии других роботов группы может не поступать вовсе либо поступать косвенным образом в процессе сбора данных об окружающей среде.

Информационный обмен в больших группах роботов при роевом взаимодействии

Группу роботов называют роем в том случае, если в группу входит достаточно большое множество R роботов $R_i\left(i=1, 2, ..., N\right)$, совместное взаимодействие которых обеспечивает решение некоторого ограниченного множества задач $P=\left\langle p_1, p_2, ..., p_c\right\rangle$. Каждый робот $R_i \in R$ способен выполнить некоторый ограниченный набор элементарных действий $A=\left\langle a_1, a_2, \ldots, a_m\right\rangle$. Робот $R_i \in R$ участвует в информационном обмене с другими роботами роя, находящимися в пределах зоны видимости робота, ограниченной радиусом L.

Методы роевого взаимодействия в больших группах роботов реализуют стратегии децентрализованного управления роботами, где каждый робот самостоятельно принимает решение о своих действиях, опираясь на доступную ему информацию. При этом роботу доступна не только информация, полученная с помощью бортовых средств сбора данных об окружающей среде, но и информация, полученная от некоторого количества роботов группы через общий канал связи.

Таким образом, при роевом взаимодействии все вычисления, необходимые для принятия решения группой роботов R, распределены между бортовыми системами управления роботов группы $R_i\left(i=1, 2, ..., N\right)$. Помимо распределения вычислений, связанных с решением групповой задачи, серьезную проблему представляет организация информационного взаимодействия роботов.

При роевом взаимодействии информационный обмен между роботами группы сильно ограничен. Каждый участник группы R_i получает информацию лишь от нескольких соседних роботов группы, образующих локальную подгруппу R', в которую входит некоторое количество n_i роботов $R'_i\left(i=1, 2, ..., n_i\right)$, расположенных в зоне видимости робота R_i, то есть в области пространства, ограниченной радиусом видимости робота L. Другие роботы группы в свою очередь получают информацию от соседних с ними роботов (рис. 5).

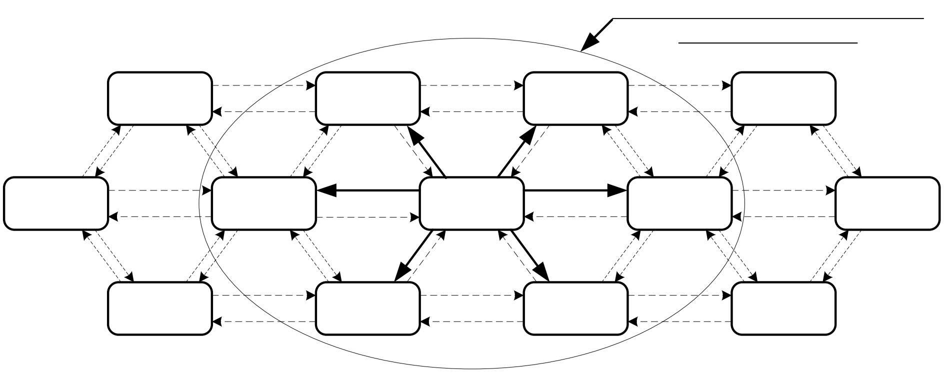


Рисунок 5 – Информационный обмен при использовании роевого управления

Так как координаты роботов в пространстве не совпадают, то образуется i-е количество локальных подгрупп R'. В больших группах роботов, при значительном территориальном разнесении роботов, зона видимости робота, ограниченная L, меньше области пространства занимаемой роботами группы, поэтому в общем случае $n_i < N$.

Объем информации, передаваемой в каждой локальной подгруппе, образованной соседними роботами, можно оценить как:

$$I_i = n_i K_{out},$$

где I_i – объем информации, передаваемой в i-й локальной подгруппе;

n_i – количество соседних роботов, образовавших i-ю локальную подгруппу;

K_{out} – объем передаваемого в канал связи сообщения.

Можно отметить, что при таком методе управления объемы передаваемой информации между роботами группы, находящимися в зоне видимости, не зависят от общего количества роботов в группе, что делает перспективным применение этих методов для управления большими группами роботов, насчитывающих сотни и даже тысячи микророботов.

Такая стратегия информационного обмена в группе позволяет избежать энергетических затрат бортовых энергоресурсов роботов, связанных с передачей данных на большие расстояния.

Общий объем информации I, передаваемый по каналам связи всех локальных подгрупп $R'_i(i = 1, 2, ..., n_i)$ большой группы роботов R, можно определить как сумму объемов информации в отдельных передачах:

$$I = \sum_{i=1}^{N} I_i = \sum_{i=1}^{N} n_i K_{out}.$$

Некоторые виды информации, передаваемые роботом R_i, могут быть важны не только роботам, входящим в локальную подгруппу R'_i, но и другим роботам группы R, находящимся на большом расстоянии друг от друга. В этом случае важное для других роботов сообщение будет передаваться по цепочке от одной локальной подгруппы R'_i к другой R'_j (рис. 6).

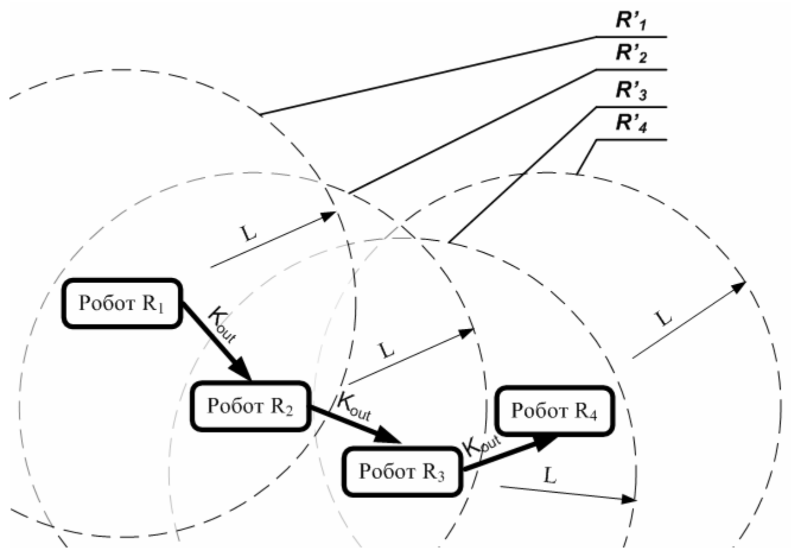


Рисунок 6 – Информационный обмен между роботами из разных локальных подгрупп при роевом взаимодействии

Когда два робота R_i и R_j находятся вне зоны видимости, для передачи важного сообщения от робота R_i к роботу R_j понадобится m_{ij} ретрансляций. Очевидно, что m_{ij} зависит от радиуса видимости *L*, а также от взаимного расположения роботов в пространстве. Роботы группы R передают сообщения в канал связи с некоторой периодичностью T, тогда максимальное время передачи важного сообщения t_{ij} можно оценить по формуле:

$$t_{ij} = m_{ij} T \ .$$

Снижение времени передачи информации в группе является важнейшей задачей. Существенно повлиять на количество необходимых ретрансляций m_{ij} затруднительно. Возникает необходимость снизить период выхода на связь роботов группы. До некоторого предела снизить период *T* можно за счет уменьшения интервалов между сообщениями роботов в канале связи (рис. 7).

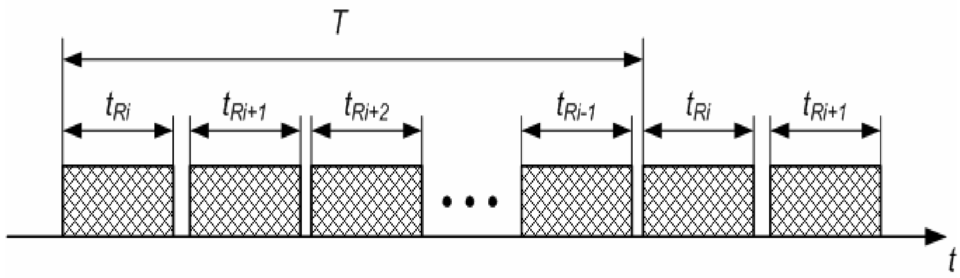


Рисунок 7 – Организация передачи сообщений роботами группы при использовании стратегий роевого взаимодействия

Дальнейшее уменьшение периода трансляции *T* возможно лишь за счет уменьшения времени трансляции t_{Ri} каждого робота R_i. Уменьшение времени на передачи информационного сообщения возможно за счет уменьшения длительности передачи каждого бита сообщения, то есть за счет повышения несущей частоты канала связи. Такой подход не всегда оправдан, ведь высокочастотные приемо-передающие устройства потребляют больше энергии, что нежелательно для миниатюрных роботов.

Предлагается ограничивать объем передаваемой за один сеанс связи информации таким образом, чтобы время передачи этого сообщения не превышало заданное на доступной частоте. Чтобы избежать информационных потерь из-за уменьшения длительности сообщений, каждый робот будет готовить очередь на отправку. Каждому сообщению, поступающему в очередь, присваивается некоторый индекс в соответствии с приоритетом отправки в канал связи. Так, например, сообщениям об опасности и о нахождении цели может присваиваться высший приоритет, а сообщениям о незначительных флуктуациях параметров окружающей среды – низший, так как другие роботы могут получить эту информацию и самостоятельно при помощи бортовых органов сбора данных об окружающей среде.

Может сложиться впечатление, что организация информационного обмена внутри локальных подгрупп, образованных соседними роботами, может вызвать технические сложности, ведь каждый робот входит сразу в несколько локальных подгрупп, и не все роботы, соседние с данным роботом, являются соседними друг с другом, а следовательно, могли бы возникнуть трудности с разграничением доступа к передаваемой информации между роботами группы. На практике все оказывается проще, так как информация,

транслируемая в канал связи одним роботам, необходима только нескольким соседним ему роботам, находящимся внутри некоторой области пространства вокруг данного робота, то мощность передающего сигнала выбирается таким образом, чтобы обеспечить уверенный прием лишь в заданной области пространства, ограниченной радиусом видимости робота L.

Протокол информационного обмена в группе роботов должен обеспечить предотвращение взаимных помех, возникающих в случае, если одновременно на связь выходит несколько роботов, не считающихся соседними, но расположенных недостаточно далеко друг от друга, чтобы обеспечить должное падение уровня принимаемого сигнала. Необходимо обеспечить поочередную передачу в канал связи не только соседних роботов, образующих локальную подгруппу, но и роботов из близлежащих локальных подгрупп. Для этого мощность передаваемого в канал связи сигнала рассчитывается с небольшим запасом, передача в канал связи не начинается не только во время трансляции роботов локальной подгруппы, но и любых других роботов группы, чей сигнал удается распознать. Такой способ организации информационного взаимодействия позволит организовать связь в больших группах роботов и не потребует сложного либо мощного оборудования, что особенно важно для миниатюрных роботов.

Информационный обмен при отсутствии выделенного канала связи

В ряде случаев возможны ситуации, когда применение выделенного канала связи для передачи информации между роботами группы оказывается затруднительным или невозможным. Это может объясняться неисправностями аппаратуры связи, непредусмотренным повышением эфирных шумов либо требованиями к малозаметности при военном применении.

Учитывая, что при роевом взаимодействии количество передаваемой друг другу роботами информации I_i относительно невелико, а передача происходит лишь между роботами, находящимися на относительно небольших расстояниях L, имеется возможность обеспечить управляемость группы роботов даже при отсутствии выделенного канала связи. Для этого вместо выделенного канала связи нужно использовать органы сбора информации об окружающей среде. Разумеется, в полной мере осуществить такое управление окажется возможным в том случае, если роботы оборудованы специальными индикационными устройствами, сигналы которых можно будет распознать с помощью штатных органов получения информации об окружающей среде.

Очевидно, что способ организации информационного обмена посредством анализа данных от средств сбора информации об окружающей среде всецело зависит от имеющихся у роботов средств сбора данных об окружающей среде. Например, роботы, оснащенные видеосистемой, могут получить необходимый минимум информации о находящихся поблизости роботах группы, если все роботы группы оборудованы цветовыми индикаторами. В этом случае радиус видимости L будет ограничен прямой видимостью. Наиболее распространенным являются видеокамеры в различных диапазонах спектра, акустические и вибрационные датчики, газовые анализаторы, лазерные дальномеры, широкополосные приемники и т.д.

Методы организации информационного взаимодействия в группе роботов во многом зависят от доступного набора рабочих органов и средств сбора данных об окружающей среде. Неоспоримым преимуществом является возможность согласованной работы

группы без оснащения роботов специальными средствами связи, что особенно актуально для миниатюрных роботов. Учитывая, что эти методы не требуют оснащения роботов специальным оборудованием, такой способ организации взаимодействия может использоваться как резервный на случай выхода из строя штатных средств связи одного или нескольких роботов или же отсутствия возможности их использования.

Выводы

Организация информационного обмена в больших группах роботов представляет собой сложную техническую задачу, решение которой во многом зависит от выбора способа управления группой роботов. При увеличении численности группы при централизованном и децентрализованном методе управления повышается сложность организации информационного обмена. При стайном и роевом взаимодействии численность группы не имеет принципиального значения. В ряде случаев выгодно, а иногда и необходимо, организовать информационное взаимодействие без помощи выделенного канала связи.

Литература

1. Управление роботами от ЭВМ / [под ред. Е.И. Юревича]. – М. : Энергия, 1980. – 264 с.
2. Робототехника / Андрианов Ю.Д., Бобриков Э.П., Гончаренко В.Н. и др.; [под ред. Е.П. Попова, Е.И. Юревича]. – М. : Машиностроение, 1984. – 288 с.
3. Каляев И.А. Распределенные системы действий коллективов роботов / Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. – М. : Янус-К, 2002. – 292 с.
4. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
5. Юревич Е.И. Основы робототехник : учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БВХ-Петербург, 2010. – 368 с. : ил. – (Учебная литература для вузов).

Д.Я. Іванов

Інформаційний обмін у великих групах роботів

У статті розглядається проблема забезпечення інформаційного обміну між роботами під час їх групового застосування. Показані особливості інформаційного обміну залежно від обраної стратегії керування.

D. Ivanov

Information Exchange in a Large Group Robots

The paper is devoted to the problem of ensuring information exchange between robots at their group use and the features of information exchange, depending on the chosen-term management strategy.

Статья поступила в редакцию 31.05.2010.